2020 年 11 月 6 日
堀藤本研究室　M2 白戸柚衣
古関研究室　D1 三好正太

2020 年度電気電子情報実験第二　課題 19
制御系設計と運動制御　実験パートテキスト

1　目的

2 日間のモータ制御実験を通して，システム同定から制御器設計，動作確認までの一連の制御器設計の流れを体験することが目的である。

1.1　実験 1 日目の目的

Feedback(FB) 制御の設計・実装ができるようになることが目的である。Ziegler-Nichols の限界感度法のように，制御系が発散するまでゲインを上げて制御器を設計する経験則に基づく方法もあるが，発散させてはいけない制御対象も存在する。また正確性を求められるシステムもある。

本実験では，制御器設計のより進んだ方法として，システム同定により得た制御対象の情報を使って，制御器を設計したりシミュレーションする方法を学習する。このような制御系設計のステップはこのようになっている。今回の実験ではこのステップを一通り体験してもらう。

Step 1　制御対象物の物理的な理解
Step 2　システム同定
Step 3　制御器設計
Step 4　シミュレーション
Step 5　実験による FB 制御の動作確認

1.2　実験 2 日目の目的

実験 1 日目で実装した FB 制御器に加えて外乱オブザーバを設計・実装する。例えば，モータを外から棒でつつく場合，この外からの力はモータを動かす力に対する外乱である。外乱オブザーバは外からの力に加えてモデル化誤差も外乱として扱い，まとめて抑圧する。外から棒でつつくとどのくらいの外乱が入ったのか記録できないので，外乱となる信号を作って加えることにする。外乱オブザーバにより外乱が抑圧される様子を観察する。

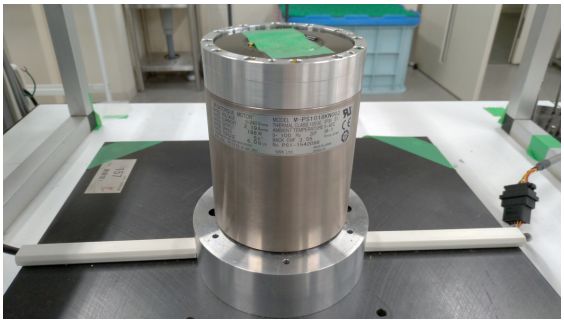


図 1　実験に用いる 1 軸 DD モータ

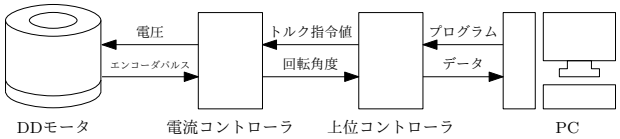


図 2　実験機器構成

2　実験機の紹介

本実験で用いる実験機は，図 1 に示す 1 軸の Direct Drive(DD) モータ [3] である。このモータの回転運動を制御することが本実験の目的である。

本実験で用いるモータは日本精工製型番 M-PS1018KN002 である。モータの電流コントローラとして日本精工製ドライブユニット型番 EDC-PS1018CB102-B を使用し，上位コントローラとしてオムロン製プログラマブル多軸コントローラ PowerPMAC CK3M[4] を使用する。PC 上でプログラムを変える PowerPMAC に書き込むことにより，様々な運動制御が実現できる。

機器構成を図 2 に示す。

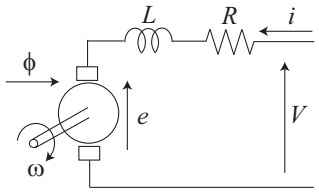


図 3　モータのモデル図

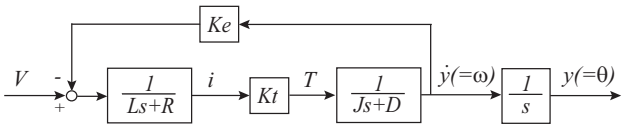


図 4　モータのブロック線図

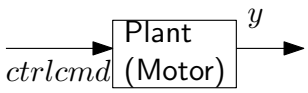


図 5　システム同定を行うためのブロック図

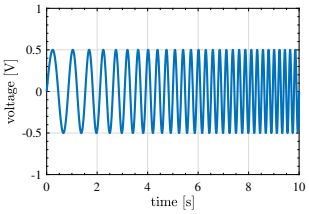


図 6　チャープサイン信号の例 (周波数 1-5 Hz, 振幅 0.5，周期 10 秒)

3　1 日目の内容

3.1　Step 1: 制御対象物の物理的な理解

運動方程式を立てて制御対象物（プラント）がどういうものか把握する。これは Step 2 で実験したシステム同定が正しいか判断するのに有効である。また同定すべきプラントの伝達関数の次数などがわかる。

課題 1　　モータの電流から角速度までの伝達関数はどのように表されるか。電気的な回路方程式・モータの誘起電圧の式・機械的な運動方程式を考えて導出しなさい。図 3 はヒントとなるモータの図である。答えは図 4 を見れば簡単だが，なぜそうなるのか導出が大事である。

課題 1 で電流から角速度までの伝達関数を計算した。本実験では，電流制御を施し，モータの電流は電流指令値に瞬時に追従すると仮定する。この役割は 2 章の電流制御ドライバが担う。

このとき，電流指令値から電流までの伝達関数が 1 と見なせるので，電流指令値から角速度までの伝達関数は電流から角速度までの伝達関数と同じになる。

この実験では位置決めをしたいので，電流から位置までの伝達関数を考えると，

$$\frac{\theta(s)}{I(s)} = \frac{K_t}{Js^2 + Ds} \tag{1}$$

と表すことができる。

3.2　Step 2: システム同定

Step 1 でプラントの伝達関数，本実験では式 (1) がわかっても，そのパラメータがすべてわかるとは限らない。そこで，システム同定によりパラメータを推定する必要がある。図 5 のようにプラント入力に電圧信号を入れて，プラントから出てくる信号を測定する。

3.2.1　信号の選択と信号の作成

システム同定の方法には，インパルス応答やステップ応答を入れて過渡応答を見る方法，サイン波を入れて周波数応答を見る方法などがある。過渡応答法はたたいたり，一定値を入れるだけなので簡単でよく使われるが，外乱・ノイズを分離できない，同定入力の振幅が精度を左右するなどの欠点もある。

本実験では，周波数応答を見ることを考える。周波数応答を見る時，サイン波を入力する。サイン波では 1 つの周波数の情報しか得られないが，ボード線図を得るためには複数の周波数の信号が必要である。1 つの方法はある周波数のサイン波を一つずつ入力して，振幅と位相を取得する方法であるが，時間がかかる。別の方法はチャープサインといって，図 6 のように，実験時間の間に周波数を徐々に上げることで複数の周波数の信号を入力する方法である。周波数の低い領域も同定するためにはその分多くの時間をかけなければならないことに注意する。また，モータの定格に抵触するような大きな電圧を印加してはいけないことに注意する。普通はモータが壊れないようにリミッタをかけているので，リミッタにより壊れる心配がなくても，正しく同定できなくなる。

課題 2　　チャープサインは C 言語でどのように実装すればよいか。チャープサインの式を調べること。

3.2.2　同定実験

課題 3 準備　　1Hz〜100Hz までのサイン波を，対数的に 7 点前後入力し，振幅と位相の情報を取得してボード線図を描け。

課題 3　　作ったチャープサインをモータに入れてみ

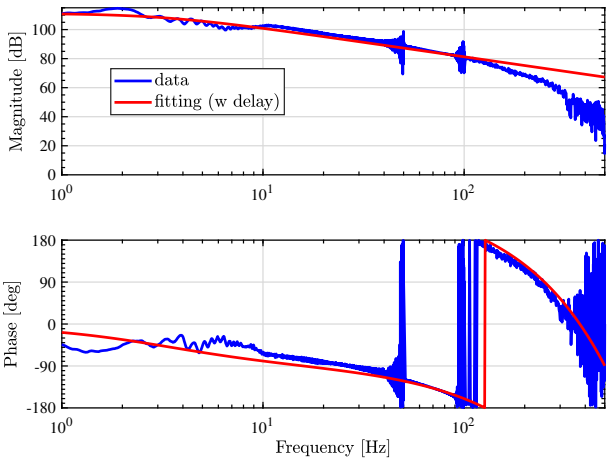


図 7　同定実験により得られたプラントのデータとフィッティング結果

よう。

`ctrl_chirp.c` に C 言語を書き，`ctrl_chirp.h` で振幅・初期位相・はじめの周波数・終わりの周波数・1 周期の時間を指定する。メインのヘッダーファイル `rticplc.h` にチャープサインを印加する時間を書く。ノイズに強くするため，数周期測定する必要がある。またチャープサインははじめの周波数と終わりの周波数の近くでは同定精度が落ちることに注意して周波数を決めること。さらに，チャープサインの分析を行う前に，制御入力が定格の範囲内かどうか，チャープサインの波形になっているか確認すること。

3.2.3　同定実験結果の分析

測定した制御入力・出力の時間データからプラントの伝達関数を得るためには，時間データを周波数データに変換し，その後周波数データをフィッティングして，Step 1 で求めた伝達関数のパラメータを推定する必要がある。こうして得られたプラントの伝達関数を，以降，実際のプラントと区別して P_n と呼ぶ。

時間データを周波数データに変換したものとそのフィッティング結果は図 7 のようになるはずである。なお，図 7 は遅れを含めた伝達関数になるとしてフィッティングしている。

課題 4　　時間データを周波数データに変換するにはどのような処理を行えばよいか。日本語で説明せよ。

課題 5　　フィッティングにより伝達関数のパラメータを推定しよう。周波数データをボード線図にプロットして，モータの伝達関数のボード線図と

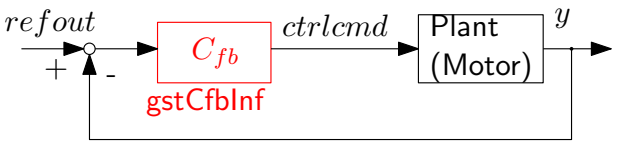


図 8　FB 制御を行う場合のブロック線図

重ね合わせ，後者の係数を調整していく。自分でチャープサインの解析をするのは難しそうなので，`kadai_bode_fitting.m` を参照のこと。

3.3　Step 3: 制御器設計

プラントの伝達関数がわかったので，これを使って制御器を設計することが可能になった。図 8 の C_{fb} を設計することが目標である。

課題 6　　極配置法で設計してみよう。PD 制御と PID 制御を作ること。

3.4　Step 4: シミュレーション

課題 7　　Simulink でシミュレーションして結果をプロットせよ。ステップ入力を加えて出力がもし発散していたら Step 3 で閉ループ制御系の極を調整すること。

3.5　Step 5: 制御器実装

3.5.1　制御器実装

制御器の設計やシミュレーションは連続系でできたが，実験機に実装する際には伝達関数の離散化が必要である。伝達関数の離散化にはゼロ次ホールド

$$z = e^{sT}$$

や，Tustin 変換（双一次変換）

$$s = \frac{2}{T}\frac{z-1}{z+1}$$

がよく用いられる [2]。それぞれの式において，T はサンプリング周期である。

Step 3 で設計した C_{fb} を離散化して係数を取り出し，C 言語の実験プログラム `ctrl_func.c` ファイルの構造体 `gstCfbInf` に反映させる。FB 制御器は図 9 のように実装する。図 9 の dB[0]，dB[1]，dB[2]，dA[1]，dA[2] は式 (2) の係数である。実は FB 制御器に限らず，分母が 2 次，分子が 2 次の形をしているものはすべて同じ形

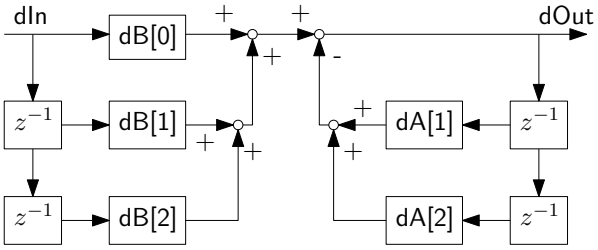


図 9　FB 制御器のブロック線図

で実装できる。

$$C_{fb,z} = \frac{dB[0]z^2 + dB[1]z + dB[0]}{z^2 + dA[1]z + dA[2]} \tag{2}$$

課題 8　　MATLAB を使って制御器を離散化し，制御器を C 言語で実装してみよう。本実験では Tustin 変換（双一次変換）で離散化することを考える。制御器の離散化は MATLAB で `c2d(sysc,Ts,'tustin')` を使うとできる。sysc は連続系の伝達関数である。制御周期 Ts は 1 ms である。

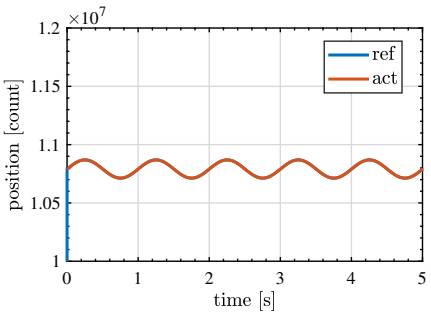
3.5.2　FB 制御の実験

課題 9　　図 10，11 は PD 制御または PID 制御の実験結果であり，モータの位置が指令値に追従している成功例である。自分が設計した制御器で位置がさまざまな指令値に追従できるか確認せよ。PD 制御と PID 制御で何か変わるだろうか。

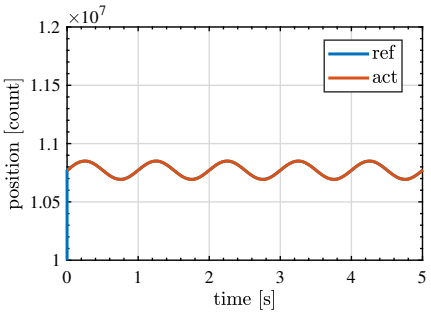
4　2 日目の内容

4.1　外乱オブザーバの設計

図 12 はモータに入力したつもりの電圧 v_1 と測定できた出力 y の情報を電圧の次元で比較してその差を補償する様子を表している。これにより，外からの力とモータのパラメータ変動による影響を外乱としてまとめて補償することができる。例えばモータを棒でつつくこともそれに含まれるが，これでは毎回同じ外乱を加えることができないので，電圧 *vdistsim* を加える。システム同定でわかったように，プラントは分母の方が次数が高いので，出力の情報から電圧を復元するために逆数をとることはできない。そこで，分子の次数が分母の次数に比べて高くならないような次数のローパスフィルタ（LPF）を入れる。平等に比較するためにモータに入力したつもりの電圧からのパスにも LPF を入れる。



(a) PD 制御の実験結果（極配置の極は 20 Hz）



(b) PID 制御の実験結果（極配置の極は 10 Hz）

図 10　サイン波の指令値に対する応答 (青：指令値，赤：モータの位置)

課題 10　　Simulink で外乱を入れて外乱オブザーバがある場合とない場合を比較し，結果をプロットしなさい。

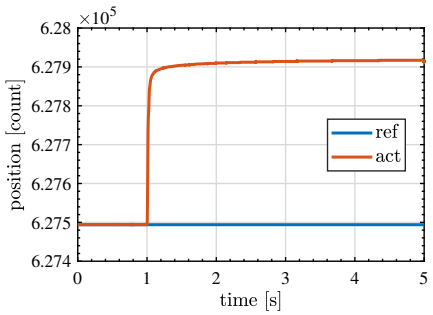
4.2　外乱オブザーバの実装

シミュレーションしたものを実験で試してみよう。外乱オブザーバの実験をしたい場合は指令値を 0，外乱を入力するが，指令値はモータのもとの位置とするプログラムとすること。

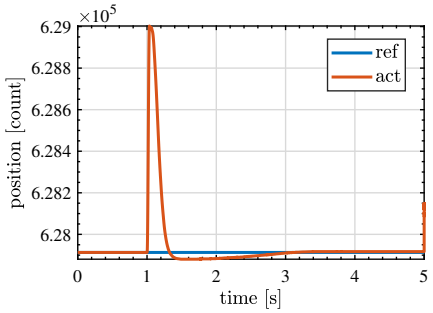
課題 11　　外乱オブザーバの G_{LPF} と $G_{LPF}P_n^{-1}$ を C 言語で実装できる形にしなさい。FB 制御器の実装と同じく，MATLAB で伝達関数を離散化して，係数を抜き出すこと。

課題 12　　$v2$ を $v0$ に加えずに，一定外乱 $v_{distsim}$ を与え，正しく外乱を推定できているか確かめなさい。外乱と推定値をプロットすること。

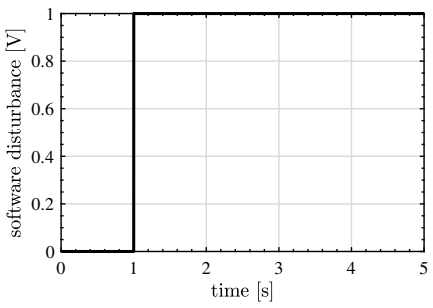
課題 13　　$v2$ を $v0$ に加えて外乱オブザーバとして一定の外乱を抑圧できるか実験しなさい。抑圧できず発散する場合にはすぐに実験をやめ，理由を考察すること。



(a) PD 制御の実験結果（極配置の極は 20 Hz）



(b) PID 制御の実験結果（極配置の極は 10 Hz）



(c) ソフトウェア外乱

図 11　ソフトウェア外乱に対する応答 (青：指令値，赤：モータの位置)

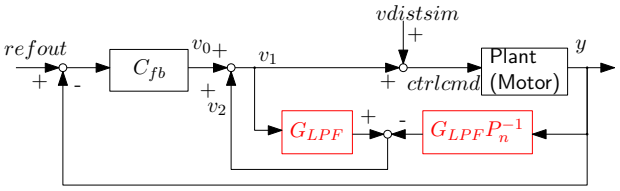


図 12　外乱オブザーバのブロック線図

5　発展課題

発展課題 1　　実験 1 日目には設計した制御器を用いてステップ応答で動作確認を行った。システム同定だけでなく設計した制御系の確認においても，周波数応答は時間応答と並んで重要である。設計した制御系の周波数応答からは，安定性と性能がわかる。例えば，開ループの伝達関数をプロットすれば (-1, 0) の点からどのくらい離れているかがわかる。また感度関数 $\frac{1}{1+CP}$ と相補感度関数 $\frac{CP}{1+CP}$ のボード線図の振幅から，低域で感度関数が低いかどうかやどの程度の周波数まで相補感度関数が 1 に近いか（帯域と言う）などがわかる。

図 9 の *refout* にチャープサインを入れて，入力 *refout* と出力 *y* から閉ループの周波数応答の解析を行いなさい。`rticplc.c` の FB 制御を行っている部分の指令値を step 指令から変更すればよい。チャープサインはシステム同定の実験を参考にして実装すること。*refout* が PMAC のカウント変数（実際の角度ではない）であることに注意する。このとき，飽和していないか確認するために制御入力 *ctrlcmd* も記録すること。開ループ伝達関数や感度関数，相補感度関数をプロットして，そのようになっているとなぜ良いのかも考察すること。

発展課題 2　　ステップ指令値の後に LPF を挿入すると，ステップ応答をなめらかにし，オーバーシュートもなくすことができる。設計した FB 制御系において，オーバーシュートをなくすためにはどのような LPF を設計すればよいだろうか。オーバーシュートが発生する原因を考えて，極と零点の位置から考察しなさい。できれば実験してみること。実験する場合は構造体 gstLPFInf の係数を変えること。システム同定によりプラントは 2 次で得られているので，設計した FB 制御器を使ってシミュレーションを行ってもよい。コードは `student_kadai_advanced` フォルダの `kadai_advanced_lpf.m` にある。LPF のカットオフ周波数を 200 Hz から変えること。

発展課題 3　　モータのモデル化で電流制御を行えば電流は電流指令値に追従できると述べた。電流制御とはどのようなものか，ブロック線図を用いて説明せよ。

6　MATLAB 便利帳

ラプラス演算子を示す s は単なる文字でないことを示すために，`s = tf('s')` と定義する。離散化してでてくる z も `z = tf('z')` と定義する。ナイキスト線図は開ループで見ること。

- pzplot　極と零点の位置をプロット
- bode　ボード線図のプロット

- nyquist　ナイキスト線図のプロット
- step　ステップ応答のプロット
- lsim　ステップ応答に限らない時間応答のプロット
- minreal 伝達関数の相殺またはほぼ相殺となる極-零点のペアを除去
- c2d 連続時間の伝達関数から離散時間の伝達関数への変換
- detrend　トレンドを除去。次数を指定できる。
- frd 周波数応答データモデルを得る。frd データはそのままボード線図でプロットできる。システム同定に使う。Signal Processing Toolbox が必要そう。
- tfestimate　伝達関数の推定。システム同定に使う。
- load データの読み込み
- saveas　データの保存。現在の figure を出す時は gcf
- ver 単体でツールボックスを見るコマンド

必要なツールボックスは以下がある。

- singal processing toolbox が必要 (mscohere)

7　MATLAB ファイルの説明

配布する MATLAB コードは以下のフォルダに入っている。

- student_expdata_plot フォルダ
  1 日目 Step2（システム同定）, Step5（FB 制御器の実験）, 2 日目（外乱推定・補償）に使用。
- student_ctrldesign フォルダ
  1 日目 Step3（制御器設計）, 2 日目外乱オブザーバ設計に使用。
- student_simulation フォルダ
  1 日目 Step4（シミュレーション）に使用。
- student_kadai_advanced フォルダ
  発展課題 2 に使用。

7.1　student_expdata_plot フォルダ

- namedef.m
  テキストファイルで出力されたデータを mat ファイルとして保存するためのファイル。txt ファイルの拡張子を変え，csv ファイルとして data フォルダの下のサブフォルダに入れる。MATLAB で csv ファイルを開いたら，左上を delimited, 出力タイプを Column vector にしてインポートする。
- identification_chirp.m
  システム同定するためのファイル。システム同定に使うデータは上の namedef.m で mat ファイルにしていたものを使う。システム同定の周期，周波数などを変えた場合は該当箇所を変えること。デフォルトではすべての周波数を一度に同定する場合のコードがかかれているが，複数に分けて同定する場合は書き換える必要がある。
- plot_fbresult
  FB 制御系のプロットをするためのファイル。データは上の namedef.m で mat ファイルにしていたものを使う。

7.2　student_ctrldesign フォルダ

student_expdata_plot フォルダで同定したシステム同定結果を使う。システム同定では速度までを同定したが，位置までがプラントなので，積分をかけるのを忘れないように気をつける。システム同定がうまく行かなかった場合はデフォルトで入っている値（以前 TA が別のモータを用いて図 7 のように同定した結果から遅れを無視したもの）を使う。C 言語の ctrl_func.c において Cpid, Cpd, LFmath, INVQmath の係数を指定しているところがあるので，そこを変更する。dB は分子，dA は分母であり，上から分子最高次の係数，分子で二番目に次数が高い項の係数の順で埋めていく。

- ctrldesign_PID.m
  PD，PID の設計に使用。
- ctrldesign_dist.m
  外乱オブザーバの設計に使用。LFmath は入力側からの LPF の伝達関数，INVQmath は出力側からの LPF の伝達関数とプラント逆モデルの積である。

7.3　student_simulation フォルダ

student_ctrldesign フォルダで設計した制御器を使う。

- sim_pid
  PID, PD 制御器のシミュレーション。
- sim_dist
  外乱オブザーバのシミュレーション。

8 実験プログラムの説明

PMAC2019 プロジェクトの紹介をする。例えばチャープサインの周波数などは ctrl_chirp.h，FB 制御器のパラメータは ctrl_func.c の中で変更する。変更する可能性があるファイルは次のファイルである。rticplc.c 以外は Libraries フォルダに入っている。

- rticplc.c　メインの処理が書かれた C 言語ファイル。
- ctrl_chirp.c チャープサインを実装するファイル。
- ctrl_func.c　FB 制御器の関数が入ったファイル。

実験のためにシステム同定，普通の制御，外乱オブザーバを用いた制御が用意されている。それぞれ rticplc.c 中の flag_exptype = 1, 2, 3 の部分である。rticplc.c の上の方で処理をしたので，ターミナルで P50 = 1 と打ち込むと flag_exptype = 1 の部分のコードが実行される。

8.1 P50 = 1, チャープサインを用いたシステム同定

システム同定はプラントに直接電圧を入力するので，ctrl_chirp.c でチャープ状の電圧を作っている。チャープサインの設定を変えるには ctrl_chirp.c, ctrl_chirp.h を変更する。その後時間の処理をしている。サンプリング周期を 1 KHz にしているので，プログラムが 1 回回るごとに時間を 0.001 秒進ませている。電圧を出力する処理は他の実験にも共通するので rticplc.c の下部にある。

8.2 P50 = 2, PD 制御・PID 制御

90 deg 回転するようなステップ指令を与えている。ステップ指令は出力と次元が合うように変換された後，指令値と出力の差が制御器に入力される。PD・PID 制御は func_TF2Exe で行われる。制御器は構造体 gstCfbInf[0] である。この制御器は rticplc.c の上部で初期化されている。この制御器の係数を変えるには ctrl_func.c を変更する。制御器の出力は電圧で rticplc.c の下部で出力される。

8.3 P50 = 3, 外乱オブザーバを入れた制御

P50 = 2 の場合と同じように FB 制御のプログラムであるが，外乱オブザーバの部分が異なる。係数は ctrl_func.c で変更する。

8.4 実験機を動かす手順

下の手順で動かせば動きます。このあたりでわからないことがあれば，普段この実験機を使っている TA に聞いてください。

- P50 = 0 にしておく
- 変更した c ファイルや h ファイルについて変更部分を保存
- 右側のソリューションエクスプローラで「すべてのプログラムをビルドしてダウンロード」を選択する。
- 下の出力を見てダウンロードできているか確認する。できていなければデバッグする。
- プロットの画面で取得したいデータを変数に入れる（TA に聞いてください）。
- プロットの画面を開いて「データの収集」を選択する。
- プロットの最大収集サンプルを一番右側に，サンプリング設定のサンプル期間を 1 にする。
- ターミナルで enable rticplc と打つ。
- P50 = 1,2,3 を選択する。
- 実験が終わったらプロットで「データのアップロード」を押す。ここで「データの収集」を押すと実験データが消えるので注意せよ。
- 後で必要になるデータをすべて同じグラフにプロットしてそのグラフの画面から「txt データとして保存」を選択。Documentation フォルダに入れる。
- P50 = 0 にしておく。

9 データ収集

図 13 に実験に必要なツールを示す。

9.1 変数の値の確認：ウオッチウィンドウ

ウオッチウィンドウではすべての P 変数を見ることができる。もし見たい変数があれば，rticplc.c 上で pshm->P[2]=pshm->Motor[1].ActPos

のように書き，ウオッチウィンドウで P2 とすれば見られる。

9.2 パソコンからの入力：ターミナル

リセットをする場合はターミナルにドルを 3 つ打ち込む（エラーが出たら TA を呼ぶこと）。変数の値を変えたい場合はここから行う。例えば，実験モードを選ぶ場合は P50 = 1 のようにする。

9.3 データの保存：プロット

上のバーで Delta tau，ツール，プロットを選択する。

9.4 データ処理

このコントローラの使用上，データは SysP3 などの名前で txt ファイルに出力されてしまう。csv ファイルで MATLAB に読み込ませ，namedef.m のファイルを用いて mat ファイルとして保存するのが便利である。

参考文献

[1] 足立，MATLAB によるシステム同定，東京電機大学出版局，1996

[2] 原島，堀，工学基礎 ラプラス変換と z 変換，数理工学社，2004

[3] メガトルクモータ | 製品情報 | 日本精工（ＮＳＫ） https://www.nsk.com/jp/products/megatorque/（2020 年 11 月 3 日閲覧）

[4] プログラマブル多軸モーションコントローラ CK3M / CK3W - 商品カテゴリ | オムロン制御機器 https://www.fa.omron.co.jp/products/category/automation-systems/multi-axis-controller/programmable-multi-axis-controller-ck3m_ck3w/（2020 年 11 月 5 日閲覧）

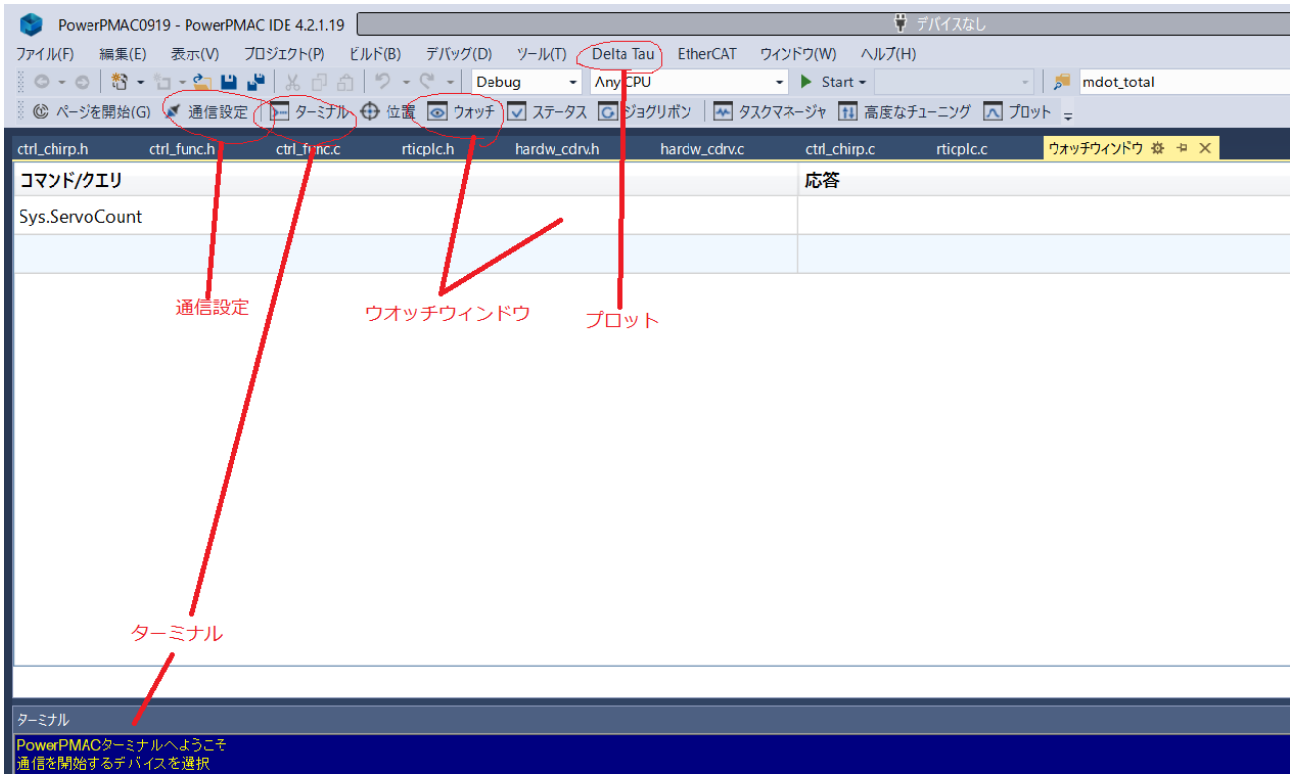


図 13　実験に必要なツール